

含有碘甲烷的混合气体脉冲放电特性研究

多丽萍 李国富 于海军 汪 健 金玉奇 桑凤亭

(中国科学院大连化学物理研究所中国科学院化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要 含碘甲烷的混合气体脉冲放电是研究放电引发的脉冲氧碘化学激光器的基础和前提保证。研究了碘甲烷的混合气体脉冲放电特性, 实验发现, 击穿电压和峰值电压与气体压强、电极间距和初始电压的乘积成线性关系, 注入能量与气体压强、放电气体的体积及初始电能的乘积成线性关系。

关键词 激光器; 碘甲烷; 脉冲放电; 注入能量; 氧碘化学激光

中图分类号 TN248.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0202012

Study of Pulsed Discharge Characteristic of Methyl Iodide Mixture Gas

Duo Liping Li Guofu Yu Haijun Wang Jian Jin Yuqi Sang Fengting

(Key Laboratory of Chemical Laser of Chinese Academy of Sciences, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract Study of pulsed discharge characteristic of methyl iodide mixture gas is important for pulsed chemical oxygen iodine laser. The pulsed discharge profile of current and voltage, break voltage and peak voltage, deposited energy were studied and the trends were obtained. Break voltage and peak voltage goes linearly with product of pressure, interelectrode gap, initial voltage, and deposited energy goes linearly with product of pressure, discharge volume and initial energy deposited in the capacitance.

Key words lasers; methyl iodide; pulsed discharge; deposited energy; chemical oxygen iodine laser

OCIS codes 140.0140; 140.3470; 140.3600; 140.3538

1 引 言

许多气体激光器都由脉冲放电来驱动^[1~3], 如准分子激光器、氮分子激光器和金属蒸气激光器及二氧化碳激光器等, 也就是说激光的能量来自于电能。还有一些气体激光器是由脉冲放电引发的, 如脉冲 HF 化学激光器、脉冲氧碘化学激光器等, 这类激光的能量来自化学能^[4,5], 脉冲放电只是用于提供化学激光所需要的介质, 比如氟原子或碘原子。这里研究的含碘甲烷的混合气体脉冲放电就是研究放电引发的脉冲氧碘化学激光器的基础和前提保证。

碘原子发生技术有很多种方法^[6], 但脉冲预混的氧碘化学激光器多使用碘甲烷气体, 脉冲放电解离碘甲烷产生碘原子, 碘甲烷 I-CH₃ 的键能为

2.4 eV, 碘甲烷解离多少应该与脉冲放电注入能量直接相关, 探寻碘甲烷的混合气体脉冲放电特性及注入能量的规律具有重要意义。在研究脉冲放电过程中, 碘甲烷的混合气体作为负载, 可以视为电阻元件(非固定阻值电阻), 注入气体中的能量应该就是电阻消耗的电能, 因此, 气体负载的注入能量与脉冲放电气体负载两端的电压和流过的电流直接相关, 如果能够测量得到气体脉冲放电的电压瞬态过程和电流瞬态过程, 即电压和电流随时间的变化峰形, 就可以通过电流电压和时间的乘积或积分获得气体负载的注入能量。

本文对含有碘甲烷的混合气体(氮气或二氧化碳作为稀释气体)进行脉冲放电实验研究, 对混合气体的放电波形、击穿电压及注入能量进行了探索, 得

收稿日期: 2010-06-28; 收到修改稿日期: 2010-08-25

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 多丽萍(1968—), 女, 博士, 研究员, 主要从事化学激光机理方面的研究。E-mail: dip@dicp.ac.cn

到一些实验结果和实验规律。大量的实验数据显示,击穿电压或峰值电压与气体压强、电极间距和初始电压三者的乘积呈现线性关系,注入能量与气体压强、放电气体的体积及初始能量三者的乘积呈现很好的线性关系。这在以往的研究中是没有被发现和认识的^[7],只有在初始电压和储能电容不变的情况下才能得出文献^[7]的变化趋势和变化规律。

2 实 验

实验装置与文献^[7]报道的基本相同,主要包括气源供给、放电腔和真空系统 3 部分。不同的是放电腔体积增大了,电极长度达到 50 cm,气流方向与光腔光轴方向相同,和放电电场方向垂直。放电电极为平板电极,接地电极两侧均匀分布有预电离针各 22 个,电极间距为 7.3 cm 和 11.3 cm。脉冲放电电流和电压波形分别用 Tektronix TCP300 电流探头和 P6015A 高压探头来测量。气体的流量由文氏管计量,放电腔气体压力由薄膜式压力传感器测量。

放电电路与文献^[8]报道的相同,有储能电容、峰化电容和预电离电容。分别对氮气碘甲烷和二氧化碳碘甲烷混合气体进行了脉冲放电的实验研究,调节极间距、储能电容和混合气体压强,研究混合气体脉冲放电的击穿电压和注入能量,其中峰化电容和碘甲烷配比有些细微差别。

3 结果讨论

3.1 脉冲放电波形

测量得到的典型脉冲电压、脉冲电流波形和功率随时间的变化波形如图 1,2 所示。图 1(a)和图 2(a)为脉冲电压 U 和电流 I 随时间的变化波形,图 1(b)和图 2(b)为功率随时间的变化波形。由图可以看到,电压峰形存在阻尼振荡,调节峰化电容,电流波峰发生变化,峰化电容不匹配电流波形存在振荡(见图 1),一定范围的峰化电容时电流呈单峰(见图 2)。从电压振荡周期的时间看,峰化电容越小,振荡周期时间越小,电流脉宽越窄。

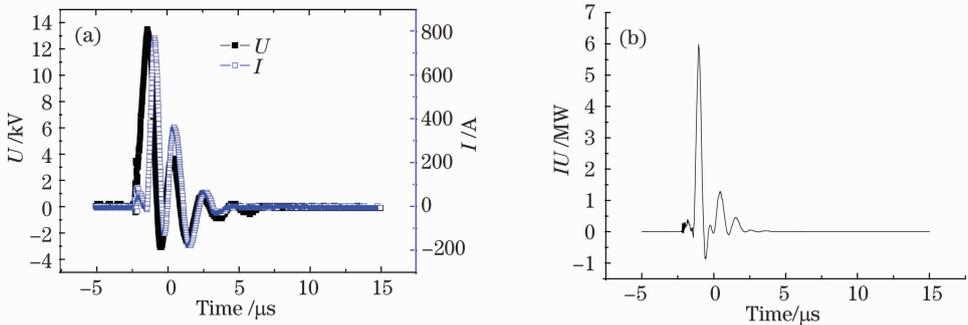


图 1 阻抗不匹配时脉冲放电的电流、电压波形(a),功率随时间的变化波形(b)

Fig. 1 Profiles of discharge current and voltage (a) and discharge power (b) at impedance mismatching

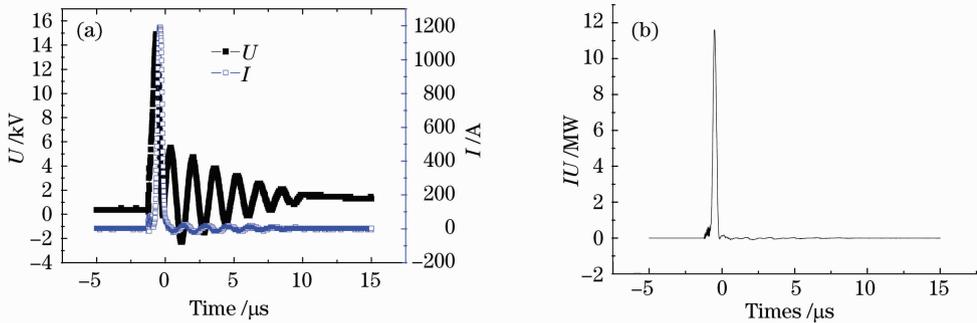


图 2 阻抗匹配时脉冲放电的电流、电压波形(a),功率随时间的变化波形(b)

Fig. 2 Profiles of discharge current and voltage (a) and discharge power (b) at impedance matching

3.2 击穿电压和峰值电压

击穿电压是对应电流开始上升起始点对应的电压值,峰值电压是电压波形的最高点。对实验数据汇总统计,分析研究峰值电压和击穿电压与一些实

验参数的关系。氮气与碘甲烷混合气体的脉冲放电,对其击穿电压和峰值电压与 Pd (气体压强 P 与电极间距乘积 d)、与 U_0 (储能电容初始加载的电压)做了统计分布,数据点比较分散,如图 3,4 所示。

然而,做击穿电压和峰值电压与 PdU_0 的乘积关系图,如图 5 所示,那几个明显偏离直线趋势的点对应的是调节峰化电容优化脉冲放电过程的实验点,其后相对固定峰化电容的实验点如图 6 所示,可见击穿电压和峰值电压随 PdU_0 三者乘积呈现很好的线性变化关系。

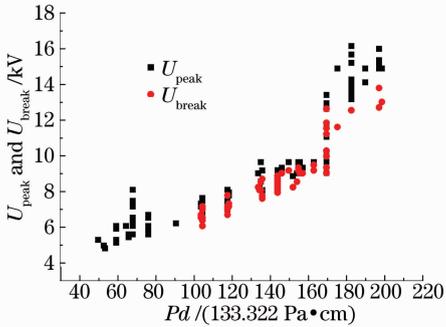


图 3 击穿电压/峰值电压随 Pd 的关系

Fig. 3 Relationship of break /peak voltage and Pd

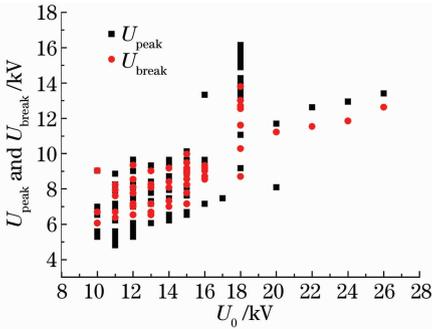


图 4 击穿电压/峰值电压随 U_0 的关系

Fig. 4 Relationship of break /peak voltage and U_0

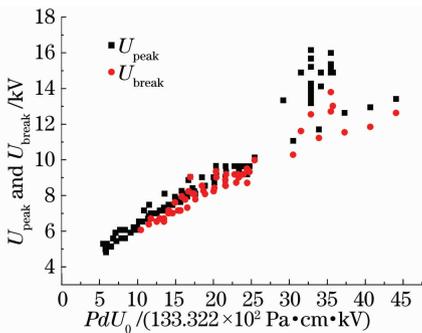


图 5 峰化电容不同时击穿电压/峰值电压随 PdU_0 的关系

Fig. 5 Relationship of break /peak voltage and PdU_0 at different peak capacitances

从图 6 可以看到,峰值电压和击穿电压相差很小,而且变化趋势也相同,线性变化关系非常明显。 $U-PdU_0$ 线性关系明显好于 $U-Pd$, $U-U_0$ 的线性关系。但是峰化电容的不同会引起变化关系的偏离,然而峰值电压和击穿电压与储能电容的大小没有

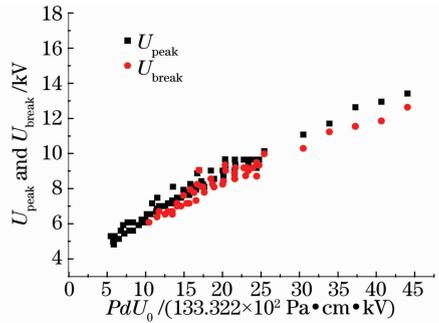


图 6 恒定峰化电容时击穿电压/峰值电压随 PdU_0 的关系

Fig. 6 Relationship of break /peak voltage and PdU_0 at constant peak capacitance

关系。

图 7 显示了氮气与碘甲烷、二氧化碳与碘甲烷混合气体脉冲放电的峰值电压随 PdU_0 (气压,极间距、初始电压的乘积)的变化关系,对不同的混合气体依旧符合此线性变化规律,尽管斜率和截距有微小的差别。

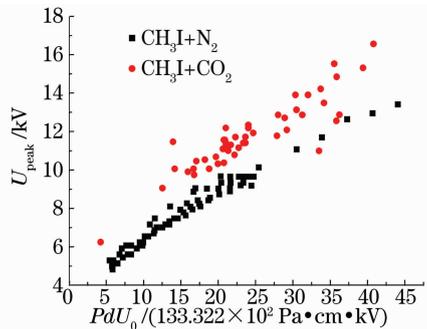


图 7 峰值电压随 PdU_0 的关系

Fig. 7 Relationship of peak voltage and PdU_0

3.3 注入能量及其规律

气体负载作为消耗能量的元件,它消耗能量的大小即为混合气体的注入能量。由功率曲线可以得到气体负载的注入能量。根据文献[7]得知,气体负载消耗的能量应该与放电气体的空间体积和气体的压强乘积线性相关,这是大多数放电气体激光器经常关注的问题,比如经常说某种气体激光器单位体积单位压强注入的能量是多少。将气体的压强 P 与放电气体体积 V 的乘积作为横坐标,注入能量作为纵坐标分析做统计分布点图,见图 8。发现碘甲烷/氮气和碘甲烷/二氧化碳混合气体脉冲放电的注入能量与气压、放电体积乘积 PV 的关系大致遵从线性关系,但相关性较差。数据点比较分散的原因是注入能量与初始储能电容加载能量 E_0 应该存在某种关系,即应该与初始电压和储能电容的大小有关。因此做注入能量与乘积 PVE_0 的分布图,见图

9. 从图 9 可以看到,注入能量与乘积 PVE_0 的线性关系更好。而且无论是氮气作混合气体还是二氧化碳作混合气体,碘甲烷混合气体的脉冲放电注入能量基本遵从同一规律。

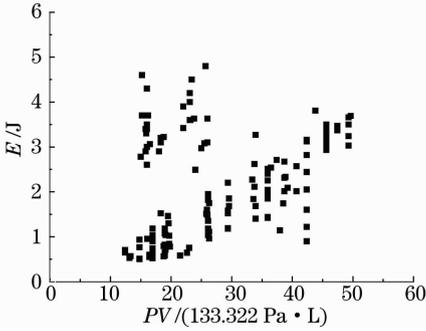


图 8 脉冲放电注入能量随 PV 的变化关系

Fig. 8 Relationship of deposited energy and PV

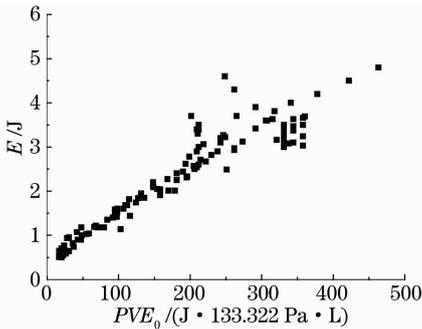


图 9 脉冲放电注入能量随 PVE_0 的变化关系

Fig. 9 Relationship of deposited energy and PVE_0

为了更加详细地分析和掌握各个不同实验条件下实验数据分布的情况,不同种类混合气体的实验数据如图 10 所示。可以看到,二氧化碳为混合气体时的注入能量相对集中在较高的数值。仔细研究实验数据,不考虑氮气碘甲烷混合气体和二氧化碳碘甲烷混合气体调节峰化电容,优化脉冲放电的实验数据,仅仅分析峰化电容相对固定的数据点,得

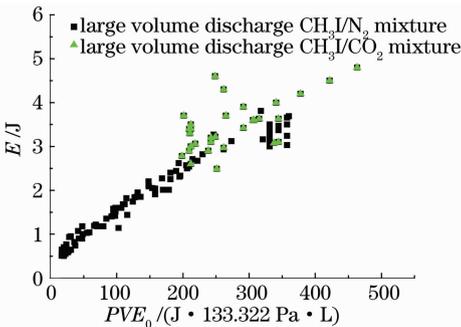


图 10 峰化电容不同时脉冲放电注入能量随 PVE_0 的变化关系

Fig. 10 Relationship of deposited energy and PVE_0 at different peak capacitances

到图 11。对比图 11,10,发现峰化电容确实影响注入能量的分布规律相关性。为了研究注入能量与碘甲烷的关系,将 PVE_0 除以碘甲烷流量 PVE_0/F_{CH_3I} 作为横坐标,做注入能量随 PVE_0/F_{CH_3I} 的变化分布,如图 12 所示。可以看到,除以碘甲烷流量以后,氮气和二氧化碳两种混合气体的注入能量的规律有点差别,但由于整个实验过程中碘甲烷流量的调节范围不够大,还不足以得出规律性的结论。

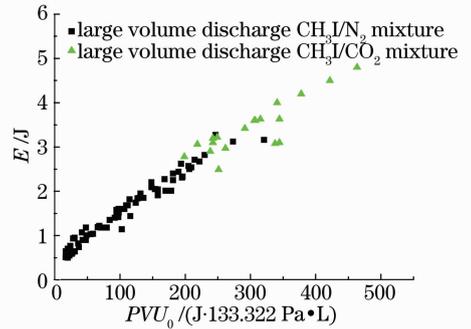


图 11 峰化电容恒定时脉冲放电注入能量随 PVE_0 的变化关系

Fig. 11 Relationship of deposited energy and PVE_0 at constant peak capacitance

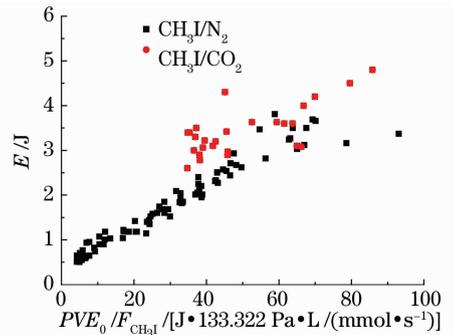


图 12 脉冲放电注入能量随 PVE_0/F_{CH_3I} 的变化关系

Fig. 12 Relationship of deposited energy and PVE_0/F_{CH_3I}

4 结 论

测量了碘甲烷混合气体脉冲放电的电压峰形和电流峰形,讨论和探究了碘甲烷混合气体脉冲放电击穿电压和注入能量与实验参量相关性,及与相关参量的变化规律。得出击穿电压和峰值电压与气体压强、电极间距和初始电压三者的乘积呈现线性关系,注入能量与气体压强、放电气体的体积及初始能量三者的乘积呈现很好的线性关系。初步研究发现,峰化电容的大小对气体脉冲放电注入能量的变化规律有一定影响;碘甲烷的含量及混合气体种类对注入能量的变化规律有影响,但影响不是很大。

参 考 文 献

- 1 V. M. Borisov, A. Yu Vinokhodov, V. A. Vodehits *et al.*. Development of high-power KrF lasers with a pulse repetition rate up to 5 kHz[J]. *Quantum Electron.*, 2000, **30**(9): 783~786
- 2 Huang Biao, Wang Yuzhi. Preionization conditions for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharge in TEA CO₂ laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **A20**(6): 426~429
黄彪, 王欲知. TEA CO₂ 激光器中均匀脉冲放电的预电离条件[J]. *中国激光*, 1993, **A20**(6): 426~429
- 3 I. L. Butzykin, S. D. Velikanov, P. A. Evdokimov *et al.*. Experimental study of pulse-periodic DF laser operation with up to 1,200 Hz repetition rate and about 25 W average power[C]. *SPIE*, 2001, **4184**: 162~165
- 4 Tang Shukai, Duo Liping, Yu Haijun *et al.*. Experimental study of combustor of combustion-driven all gas-phase iodine laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1403~1406
唐书凯, 多丽萍, 于海军等. 燃烧驱动全气相化学碘激光燃烧室实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1403~1406
- 5 Tang Shukai, Duo Liping, Jin Yuqi *et al.*. Small signal gain measurement of combustion-driven all gas-phase iodine laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1704~1707
唐书凯, 多丽萍, 金玉奇等. 燃烧驱动全气相碘激光的小信号增益测试[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1704~1707
- 6 Li Liucheng, Tang Shukai, Duo Liping. Research progress of atomic iodine generation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 091406
李留成, 唐书凯, 多丽萍. 碘原子发生技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(9): 091406
- 7 Duo Liping, Li Guofu, Yu Haijun *et al.*. Study of pulsed discharge of gases simulated in N₂-chemical oxygen-iodine laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2315~2318
多丽萍, 李国富, 于海军等. 模拟 N₂-氧碘化学激光器混合气体脉冲放电实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2315~2318
- 8 Li Guofu, Yu Haijun, Duo Liping *et al.*. Pulse operation of chemical oxygen-iodine laser by pulsed gas discharge with the assistance of spark pre-ionization[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(11): 114201